

# OPTIMIZACIÓN ECONÓMICA DE CONDUCCIONES

Aplicación al caso de tuberías de impulsión (\*)

El problema de encontrar el diámetro económico para una conducción ha sido objeto de diversos estudios, sobre todo a lo largo del siglo pasado, existiendo abundante bibliografía al respecto, así como numerosas expresiones matemáticas para su cálculo más o menos aproximado. (1)

En el estudio de esta optimización, dejando aparte las expresiones de carácter empírico y aquellas otras que son sólo simples estimaciones, el diámetro económico de una impulsión se obtiene haciendo mínima la suma de los costes de inversión inicial de la conducción y del equipo de bombeo, más la suma de los costes anuales actualizados debidos a la explotación, comprendiendo fundamentalmente el consumo eléctrico a lo largo de la vida útil de la inversión.

El método correcto para calcular este diámetro consiste en hallar el mínimo de la función  $C(D)$ , que, a su vez, es la suma de las funciones:

$C_1(D)$ : Coste de la tubería y accesorios

$C_2(D)$ : Coste de los equipos de bombeo

$C_3(D)$ : Coste actualizado de la energía necesaria para el bombeo

De entre las fórmulas que tratan de resolver el problema de forma rigurosa, y que pueden encontrarse en la bibliografía, cabe destacar las siguientes:

$$D = 1,263 \left( \frac{fph}{\eta ac} \right)^{0,166} Q^{0,5}$$

Mendiluce 1966 (2)

Juan M. Pero-Sanz  
Doctor Ingeniero Industrial

$$D = 1,106 \left( \frac{fph}{\eta ac} \right)^{0,143} Q^{0,43}$$

Melzer 1964 (3)

$$D = 1,165 \left( \frac{fph}{\eta ac} \right)^{0,124} Q^{0,46}$$

Vibert (4)

Esta última constituye una adaptación de la original que data de 1948, preparada para tuberías de fundición gris y actualizada para hacerla comparable con las (2) y (3) anteriores.

Las variables indicadas en las fórmulas tienen el siguiente significado:

$D$ : Diámetro económico de la conducción

$f$ : Factor de fricción en la fórmula de Darcy-Weissbach.

$\eta$ : Rendimiento global del grupo motobomba

$a$ : Factor de amortización

$h$ : Número de horas de funcionamiento al año.

$p$ : Precio del kWh.

$c$ : Coeficiente económico que relaciona el diámetro de la tubería con su coste unitario.

Todas estas fórmulas consideran que el coste de los equipos de bombeo no tiene influencia en el cálculo del diámetro económico de una elevación, y por ello no lo tienen en cuenta, estableciendo sólo el mínimo de  $C_1(D)+C_3(D)$ .

En el estudio realizado (1) se pone de manifiesto que el coste de los equipos de bombeo no es preciso que se considere más que en el caso de elevaciones que funcionen menos de 4 horas/día, lo cual no es muy común en esta clase de instalaciones, ya que, por su naturaleza, se dimensionan en general para funcionamiento continuo o al menos para funcionar un número elevado de horas diario. En el Simposio sobre "Aspectos económicos del agua subterránea" (UNESCO, Barcelona 1987) (4) el profesor J. Agüera, estableció una fórmula de optimización del diámetro de una elevación en la cual sí consideraba el coste de los equipos de bombeo y que guarda cierta similitud con la de Vibert:

$$D = 1,165 \left( \frac{f}{\eta} \right)^{0,154} \left( 0,5 + \frac{ph}{ca} \right)^{0,154} Q^{0,467}$$

Cuando se analiza el conjunto de todas estas fórmulas, y debido al método por el que han sido calculadas, que constituye el método racional a seguir para realizar esta optimización, se intuye que debieran ser coincidentes. Ello no es así porque cada autor ha presupuesto una función diferente  $C_1(D)$  para relacionar el coste de la tubería con su diámetro. En la función de costes que es de la forma  $C_1 = cD^k$ , los valores del exponente  $k$  son respectivamente: 1, 1,5, y 2, para las fórmulas de Mendiluce, Vibert-Agüera, y Melzer.

La utilización de estas fórmulas presenta algunos inconvenientes: El primero lo constituyen las discrepancias entre ellas sobre el tipo de fun-

\* Este artículo resume la Tesis Doctoral del Autor, dirigida por D. Vicente Uría Aróstegui, que ha sido calificada con Sobresaliente cum laude por unanimidad, por el Tribunal correspondiente en la U.P.V.

ción a considerar para relacionar el coste de la tubería con su diámetro  $C_1(D)$ , lo que hace que, al ser diferentes estas funciones, las fórmulas sean aplicables con mayor o menor exactitud según el material elegido para la tubería y la clase de instalación que se realice: aérea, enterrada, etc. Para cada optimización será necesario seleccionar una determinada fórmula que sea la más apropiada al caso por haber sido calculada con una función de costes  $C_1(D)$  idéntica a la que presente la clase de tubería con la que construirá la impulsión.

Para cada optimización concreta será preciso, por lo tanto, calcular la función de coste  $C_1(D)$  mediante un ajuste, utilizando la tabla de costes disponible para todos los diámetros comerciales de esta tubería. Esta función es siempre aproximada incluso si se utiliza para su cálculo un buen método de ajuste, por ejemplo el de mínimos cuadrados con un buen coeficiente de determinación. Por lo tanto, será prácticamente imposible que la función así calculada coincida exactamente con una de las que los autores estimaron en su día para calcular sus fórmulas.

Para comprobar lo dicho se han calculado, mediante el ajuste correspondiente, las funciones de coste actual de diversas clases de tuberías en función de su diámetro. En el Cuadro 1 se pueden apreciar los resultados, concretamente los valores de  $c$  y de  $k$  para estas funciones: En la columna correspondiente a costes de la conducción instalada, se han tenido en cuenta los costes correspondientes a obra civil, montaje, pintura, sopo-

tes, etc. Las columnas de datos situadas más a la derecha recogen los valores del coeficiente y el exponente calculados considerando solo los costes sólo de la tubería. En este cuadro se aprecia la variación importante de la función de costes según la clase de tubería que se considere y según su forma de montaje, que es para este caso: Enterrada para las tuberías de fibrocemento, poliéster y fundición y aérea para el resto.

Ninguna función de costes tiene un exponente  $k$  coincidente con el de una cualquiera de las fórmulas propuestas por los diferentes autores.

El inconveniente indicado, que afecta de modo fundamental a la exactitud del cálculo del diámetro óptimo, suele pasarse por alto cuando se observan en la bibliografía ejemplos de cálculos concretos, ya que estos se limitan generalmente a aplicar una de las fórmulas, u otras más simplificadas específicas para una clase de tubería. Las fórmulas de optimización contienen variables que dependen del tiempo y, por ello, tienden a perder actualidad con el paso del mismo. Veamos algunos factores que influyen en ello:

a) Los precios de las tuberías, que, además de revisarse periódicamente como consecuencia de la inflación, pueden sufrir variaciones para algunos conjuntos de diámetros en función de cambios y/o mejoras en los procesos de fabricación. Lo anterior dará origen a variaciones importantes en las funciones  $C_1(D)$  no solamente por la actualización periódica de precios sino por variaciones restringidas a uno o varios en-

tornos concretos de diámetros comerciales.

b) Variación anual de los costes de energía eléctrica.

c) La variación anual del coste de los equipos de bombeo, aunque su influencia en general, es menos importante.

d) El factor de amortización (inverso del factor de actualización) cuya variación sólo en los últimos años ha sido muy importante. (Ver artículo del autor "La moneda única y la selección de inversiones en la empresa" DYNA Junio de 1999)

En la práctica se observa que se suele partir de la aproximación que suponen las fórmulas existentes, que no serán en principio aplicables a cada caso concreto y se suele justificar por ello, la necesidad de realizar un estudio de costes globales, ya que se parte de fórmulas que son siempre aproximadas. No se suele invertir mucho tiempo en el proyecto en calcular  $C_1(D)$ , que además será siempre una función aproximada. Además, la experiencia demuestra que sólo se realizan estudios de costes globales en instalaciones con caudales muy grandes.

En el Cuadro 2 se detallan los exponentes de las funciones potenciales de costes obtenidas con valores prácticos de diversas clases de tuberías en la actualidad, los cuales como se ha indicado, no coinciden con los tomados por los autores para calcular sus fórmulas. Por ello resulta más aconsejable acometer la optimización sin prefijar cual es el valor el exponente  $k$  de la función potencial de costes.

Cuadro 1 ( $C_1=cD^k$ )

Clase de tubería	Coste de la conducción instalada		Coste sólo de la conducción	
	c(€)	k	c(€)	k
Fibrocemento	602,85	1,274	285,11	1,534
Poliéster	612,89	1,377	273,10	1,484
Fundición	590,52	1,334	275,36	1,744
Acero estirado	1317,37	1,827	1147,76	1,830
Acero soldado helicoidal	275,96	1,046	172,09	0,955
Acero inoxidable	5151,30	1,312	4518,22	1,276

Así, realizando el estudio correspondiente de la función óptima, se ha llegado a la expresión de carácter general para obtener el diámetro económico de una impulsión:

$$D = \left( \frac{4,056}{k} \right)^{\frac{1}{k+5}} \left( \frac{fph}{\eta ca} \right)^{\frac{1}{k+5}} Q^{\frac{3}{k+5}} \quad (6)$$

básicamente igual a las propuestas por los diferentes autores pero sin prefijar el valor de  $k$ . La notación empleada es la misma que la utilizada en las expresiones (2) (3) y (4).

En el trabajo efectuado se ha llegado también a la expresión general del cálculo del diámetro económico para impulsiones que funcionen un número de horas reducido al año y sea por lo tanto necesario considerar el coste de los equipos de bombeo en la optimización a realizar:

$$D = \left( \frac{4,056}{k} \right)^{\frac{1}{k+5}} \left( \frac{f}{\eta} \right)^{\frac{1}{k+5}} \left( \frac{2b}{c} + \frac{ph}{ca} \right)^{\frac{1}{k+5}} Q^{\frac{3}{k+5}} \quad (7)$$

En esta fórmula sólo interviene como novedad con respecto a la anteriores, el factor  $k$  que es el coeficiente de proporción en la ecuación que fija el coste de un grupo motobomba en función de su potencia, es decir:  $C_s = d + bP$  en la que P es la potencia de la bomba que realiza la elevación. El resto de variables son las indicadas anteriormente.

Si b resulta igual a cero, lo que suponen no considerar el coste de los equipos de bombeo en la optimización, la expresión (7) coincide con la (6)

### Metodología de cálculo

Habiendo deducido las herramientas principales para realizar la optimización es preciso establecer cómo debería ser la metodología a emplear para acometerla.

La metodología que expndremos a continuación se basa en realizar una optimización lo más exacta posible, dejando las decisiones de tipo práctico a tomar por parte del

Cuadro 2

Exponente en la fórmula	k	Máximo	Mínimo
<b>Mendiluce</b>	1	-	-
Acero soldado helicoidal	1,046	1,748	0,585
Fibrocemento	1,274	1,783	0,721
Acero inoxidable	1,312	1,464	1,233
Fundición	1,334	1,821	0,192
Poliéster	1,378	2,003	0,335
<b>Vibert-Agüera</b>	1,5	-	-
Acero estirado sin soldadura	1,827	2,212	1,033
Melzer	2	-	-

proyectista para una fase posterior, ya que se trata de decisiones que deben ser adoptadas para completar un cálculo teórico que en principio debe ser lo más exacto posible lo que es en principio opuesto a una optimización utilizando una fórmula aproximada. Las diversas fases de la optimización son las siguientes:

1) Se debe comenzar por la aplicación de la expresión (6) o, en su caso la expresión (7). Para realizarlo es preciso conocer el exponente  $k$  de la fórmula de costes de la conducción en función del diámetro. Para calcular k se puede seguir el camino tradicional consistente en ajustar una función a los costes de la conducción, o bien, como se propone en el trabajo (1), utilizar uno más simplificado que consiste en ajustar la función de costes  $C_c(D)$  solamente en un entorno cercano al diámetro que será el económico. Ello se realiza con una estimación del diámetro económico fijando un intervalo para el ajuste y se comprueba finalmente si el diámetro obtenido como económico está comprendido en el intervalo utilizado para calcular la función costes. El método anterior evita, por ejemplo, estar optimizando una conducción cuyo diámetro final será, por ejemplo, 800 mm utilizando en el cálculo de la función costes los de diámetros de 30 a 150 mm, muy alejados de la realidad técnica y económica de diámetros mayores.

En el Cuadro 2 se reflejan los diferentes valores de los exponentes  $k$

generales ajustados para cada clase de tubería y los obtenidos realizando ajustes de las funciones de costes de esas mismas tuberías en entornos determinados. Se aprecia que la diferencia entre los valores máximos y mínimos para cada clase de tubería es muy importante. De ahí la conveniencia, para obtener una mayor exactitud, de realizar el ajuste de las funciones de costes en entornos restringidos de diámetros comerciales, en lugar de realizar el ajuste para la totalidad de los diámetros.

Es preciso indicar que, aunque se trate de tubería de la misma clase, las leyes que rigen la formación de precios a lo largo de los diferentes grupos de diámetros serán en general diferentes y, por lo tanto, el ajuste de una sola función de costes no resulta un procedimiento tan adecuado como realizar el ajuste en un entorno determinado de diámetros que contenga el económico.

2) Determinado  $k$  como se ha indicado, la aplicación de la fórmula de optimización es inmediata, pero resulta conveniente estudiar la posible variación de los parámetros que intervienen en la misma para tenerla en cuenta, ya que sin duda se producirá a lo largo de la vida útil de la conducción. Como resumen de las principales recomendaciones realizadas en el trabajo (1) sobre la variación de parámetros, se recogen las siguientes:

$f$  y  $\eta$ : No presentan posibilidad de variación importante a lo largo de la vida práctica de la instalación. No obstante, su tendencia es a aumentar

a lo largo del tiempo en el caso de  $f$ , con lo que aumentará el consumo eléctrico de bombeo, y a disminuir en el caso de  $\eta$ , debido al desgaste natural de los equipos con el paso del tiempo.

$\alpha$ : Este valor depende de la tasa de actualización que se emplee para estudiar la rentabilidad del proyecto que, a su vez, está indirectamente ligada a la tasa de interés a largo plazo en el país de que se trate. Para el caso de los países de la Unión Europea se trata de tasas pequeñas y con tendencia a la estabilidad.

$p$ : La tendencia del precio de la energía eléctrica en España ha sido a la baja en los últimos años (del orden el 4% medio acumulativo de 1992 - 2000 en términos reales) y, a la hora de aplicar este valor, deben tenerse en cuenta no sólo la tarifa a utilizar sino la tendencia de evolución del coste de la energía a lo largo de la vida útil de la inversión. La información disponible en la actualidad indica que no será posible que las tarifas eléctricas continúen en su deslizamiento de precios a la baja.

La variación de los parámetros anteriores hace que el diámetro económico de una inversión esté muy condicionado por la zona económica en la que se realice la optimización. Se obtendrán en general diámetros económicos más elevados en los países con elevado índice de inflación y costes elevados de la energía eléctrica.

3) Aplicada la fórmula correspondiente, habiendo previsto los valores más convenientes para los parámetros que intervienen, se habrá obtenido el diámetro económico teórico y deberá elegirse un diámetro comercial, (en principio superior al económico) para tener en cuenta la evolución de la eficiencia de la instalación.

En el caso de instalaciones en las que, debido al elevado caudal circulante, no tenga sentido hablar de diámetros comerciales, el óptimo calculado será el diámetro que deberá elegirse para realizar el proyecto de la elevación.

4) Por último, será preciso proceder a realizar la Ingeniería de detalle de la instalación, pero, como se ha

indicado, una vez calculado el diámetro económico por un método más exacto que el que proporciona una simple estimación.

### Resumen bibliográfico

- (1) J. M. Pero-Sanz. "Optimización económica de conducciones: Aplicación al caso de tuberías de impulsión".

- (2) Mendiluce E. "Cálculo de las tuberías de Impulsión". Revista de Obras Públicas. Enero 1966.

- (3) Melzer A. "Sur le calcul du diamètre économique d'une conduite de refoulement". Centre Belge d'étude et de documentation des eaux, n° 242 Enero 1964 págs. 20-23.

- (4) Agüera Soriano, José. "Estudio sobre el diámetro más económico de una impulsión". Monografía n° 83 Servicio de publicaciones de la Universidad de Córdoba 1987.

- (5) Agüera Soriano, José. "Mecánica de fluidos incompresibles y turbomáquinas hidráulicas" Editorial Ciencia 3. Madrid, 1996.

## SUPERORDENADOR PARA VER EL NACIMIENTO DE LAS ESTRELLAS

Los astrónomos han podido ver, con un detalle nunca conseguido hasta ahora, el nacimiento de un grupo de estrellas gracias al nuevo superordenador de la Astrophysics Fluid Facility (UKAFF) del departamento de Física y Astronomía de la Universidad de Leicester. Gracias a esta instalación, los astrónomos se podrán adelantar en la observación de cualquier fenómeno astronómico, desde el nacimiento de las estrellas hasta la formación de los agujeros negros. "Esto es justo lo que necesitábamos para estudiar mejor los planetas descubiertos recientemente girando alrededor de otros soles de nuestra galaxia".

La UKAFF es un laboratorio que ha costado nueve millones de euros

financiado conjuntamente por Joint Research And Enterprise Initiative, un Organismo público británico, y Silicon Graphics en colaboración con el Particle Physics and Astronomy Research Council (PPARC) y el Leverhulme Trust.

Este superordenador cuenta con 128 procesadores, 64 Gbytes de RAM y 1 Tbyte (1.000 Gbytes) de memoria en disco duro, características que le convierten en mil veces más potente que un ordenador normal. Con él, los astrónomos ya pueden realizar en días cálculos que antes exigían años. Los cálculos que han llevado al descubrimiento del nacimiento de la constelación han estado dirigidos por el Instituto de Astrono-



Superordenador Origin 3000 de Silicon Graphics.

mía de la Universidad de Cambridge aprovechando toda la potencia del superordenador Origin 3000.

La visualización del nacimiento de una constelación implica cálculos similares a los de la simulación de un vuelo supersónico o el diseño del motor de un coche. ■